

有轨电车制动系统防滑控制优化研究

孙环阳 吴明赵 薛 彬 朱鹏成 吕 豪

(南京中车浦镇海泰制动设备有限公司, 211899, 南京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 介绍了国内某有轨电车制动系统的组成和防滑控制的工作原理。针对其在防滑试验过程中出现的低速误检滑行和滑行轮速度跌落过多的问题,对滑行试验数据进行了分析,并分别提出了模拟轴减速度和液压控制的优化方案。

关键词 有轨电车; 制动系统; 防滑控制; 优化

中图分类号 U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.005

Optimization of Wheel Anti-skid Control for Tram Braking System

SUN Huanyang, WU Mingzhao, XUE Bin, ZHU Pengcheng, LYU Hao

Abstract The composition of a tram braking system in China and its working principle are introduced. Aiming at problems like false detection of wheel slide in low speed areas and excessive sliding wheel speed drop, the sliding wheel test data is analyzed, optimization schemes of simulated shaft deceleration and hydraulic control are proposed separately.

Key words tram; brake system; anti-skid control; optimization

Author's address CRRC Nanjing Puzhen Haitai Brake Equipment Co., Ltd., 211899, Nanjing, China

在车辆制动过程中出现车轮滑行时,防滑控制系统可通过及时调整制动力避免车轮擦伤的风险,同时也可以最大程度地利用轨道的黏着条件,缩短制动距离。然而,由于轮轨黏着系数随列车运行速度的提高而降低,使得列车高速运行时出现滑行的风险更大。

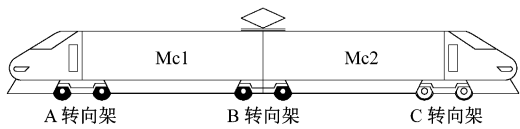
目前,防滑控制的研究多集中在速度较高的高速铁路、动车组等领域,而对有轨电车制动系统防滑控制及实际运用等方面的研究较少。文献[1-3]从滑行理论、控制算法及试验效果等角度对列车防滑控制开展了广泛的研究。文献[4]基于模糊控制算法对液压制动防滑器模型进行了仿真分析。有轨电车与公路交通车辆混行时,其设计制动减速度通常

较大,黏着系数利用相对更高;相比其他铁道车辆,其轨面条件更加复杂(如落叶、杂草和其他污质等),如果防滑控制性能不佳则更容易导致车轮擦伤、增加运营成本等问题。因此,有必要对有轨电车的防滑控制进行研究。

本文在对国内某有轨电车制动系统的组成及防滑控制原理介绍的基础上,结合其在正线防滑试验中出现的问题,对有轨电车防滑控制的优化方案及试验效果展开了研究。

1 有轨电车制动系统的工作原理

该有轨电车采用2模块、3转向架的编组形式,见图1。各转向架配置独立的、采用液压制动方式的制动系统。



注:Mc1,Mc2 表示带司机室的动车。

图1 有轨电车编组

Fig. 1 Tram configuration

制动系统由 EBCU(电子制动控制单元)、HBCU(液压制动控制单元)、基础制动装置、蓄能器及速度传感器等部件组成,见图2。

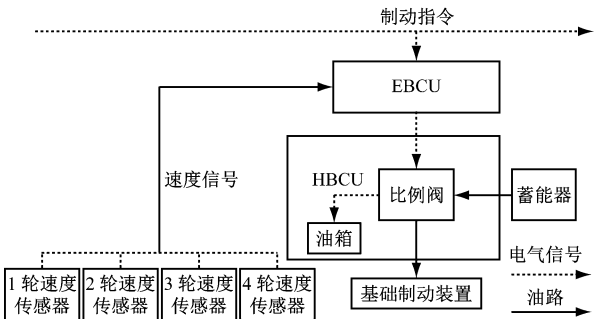


图2 有轨电车制动系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of tram braking system

EBCU 作为制动系统的核心控制部件,具有制

动指令接收、制动力计算、液压力控制及防滑控制等功能。HBCU 内部集成了电机、泵、比例阀、压力传感器等液压元件。EBCU 控制 HBCU 内的电机工作,电机驱动泵产生的压力油输送至蓄能器作为制动系统的压力源。同时,HBCU 内的比例阀根据控制信号调节输出液压力至基础制动装置。基础制动装置包含制动夹钳、制动盘和闸片,制动夹钳采用弹簧储能方式,即充压缓解制动、减压制动施加。

缓解制动时,EBCU 控制比例阀使蓄能器内压力油经比例阀向基础制动装置充压,以减小或撤销制动力;制动施加时,EBCU 控制基础制动装置内的压力油经比例阀流回至油箱,从而产生制动力。

制动系统以转向架为单位进行防滑控制。在制动过程中,EBCU 接收速度传感器采集的 4 路车轮速度信号,并依据减速度(β)检测、速度差(ΔV)检测等方法来检测滑行。 β 检测是根据本车轮的减速度变化与阈值的关系来判断车轮是否滑行。 ΔV 检测是根据某车轮速度与基准轴速度的偏差是否超过阈值来判断车轮的滑行状态。EBCU 在实测的 4 个车轮速度和预设的模拟轴速度中,选择其中的最高值作为基准轴速度。设置模拟轴速度的目的是为了在全轴滑行时尽可能地获取相对准确的列车运行速度,模拟轴速度是由上个计算周期的基准轴速度通过预设的模拟轴减速度推算得出^[1]。

当 EBCU 检测到车轮出现滑行时,立即控制比例阀增大输出液压力,从而减小转向架的制动力,使滑行轮速度尽快恢复至列车运行速度;当检测到滑行恢复后,控制比例阀减小输出液压力,尽快恢复转向架制动力。车轮防滑控制示意图见图 3。

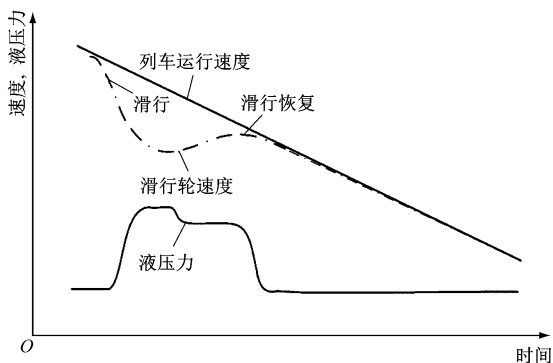


图3 有轨电车车轮防滑控制示意图

Fig. 3 Diagram of tram wheel-slide-control

2 有轨电车防滑试验

为验证制动系统的防滑控制性能,有轨电车在

正线上开展了防滑专项试验。试验时,Mc2 端为试验列车的主控端,在 C 转向架的 1 轮和 2 轮前喷洒减摩液以模拟低黏着条件。试验过程中,出现了低速区段误检滑行和低黏着下滑行轮速度跌落过多的现象。

2.1 低速区段误检滑行

在干轨条件下对有轨电车进行最大常用制动试验时,各转向架制动系统的 EBCU 在低速区段(约 5 km/h)异常控制充压缓解制动,见图 4 中的制动缸压力曲线。然而,通过采集设备实时监测的各转向架车轮速度来看,在整个制动停车过程中各车轮实际速度一致性较好,处于正常减速水平。因此,可初步判断 EBCU 误检滑行,此时车辆执行防滑控制,同时触发车辆撒砂系统工作。

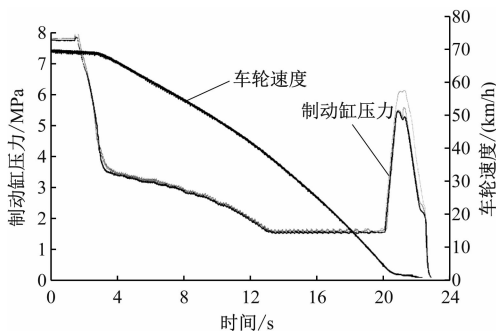


图4 有轨电车最大常用制动试验

Fig. 4 Test of tram maximum service brake

通过进一步分析其中 1 个转向架实时采集的车轮滑行数据发现:列车运行速度约从 20 km/h 开始,各车轮速度与 EBCU 设置的模拟轴速度逐渐发生偏离,见图 5。由于 EBCU 的基准轴速度取自模拟轴速度和各车轮速度中的最高值,而模拟轴速度均高于各车轮实际速度,导致 EBCU 始终将模拟轴速度作为基准轴速度。当车辆模拟轴速度为 5 km/h 左右时,EBCU 检测到各车轮速度与基准轴速度的偏差满足 ΔV 的滑行检测条件后执行防滑控制。因此,可判断该问题是由于设置的模拟轴减速度不合理所致。

2.2 低黏着下滑行轮速度跌落过多

在湿轨条件下进行紧急制动防滑试验时,由于轨道的黏着系数较低,滑行轮速度与其他正常车轮的速度偏离较大,即滑行轮速度跌落过多。当列车运行速度为 40 km/h 左右时,C3 轮的速度快速跌落至 10 km/h 以下,见图 6。

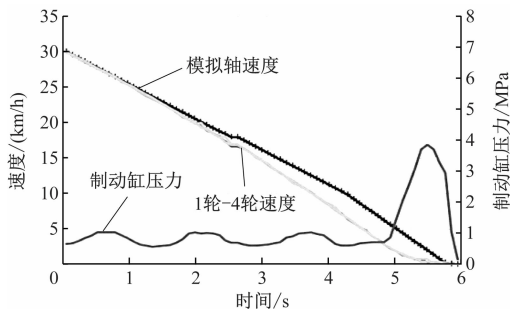


图5 有轨电车低速区段误检滑行试验

Fig. 5 Tram false detection of sliding in low speed area

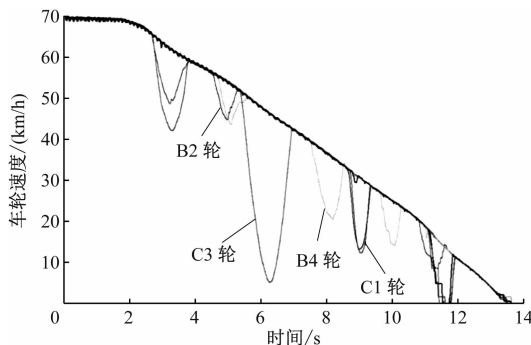


图6 有轨电车紧急制动防滑试验

Fig. 6 Tram sliding test of emergency braking

另外,通过实时采集的A转向架滑行数据亦发现了类似情况。当列车运行速度为30 km/h左右时,A2轮速度基本跌落至零,见图7。

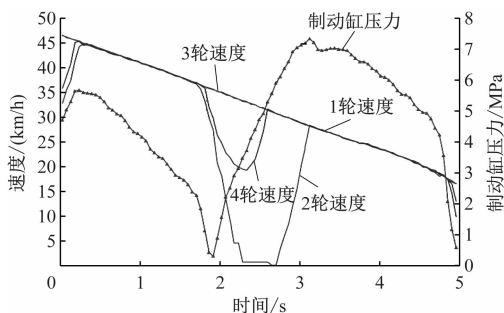


图7 有轨电车A转向架滑行试验数据曲线

Fig. 7 Sliding test data curve of tram bogie A

通过进一步分析图7中的滑行数据,发现:

1) 当EBCU检测出车轮滑行至制动缸压力开始上升的时间较短,说明EBCU能较快地检测出车轮滑行。

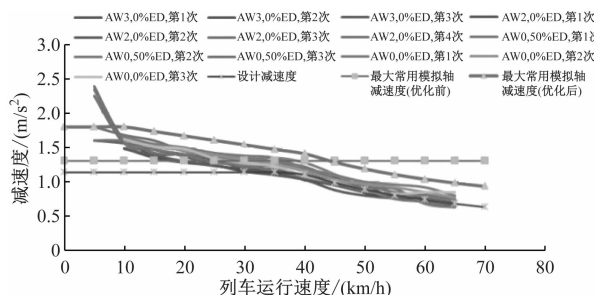
2) 当EBCU检测出2轮滑行并控制增大制动缸压力直至2轮速度开始恢复历时约0.7 s;在制动缸压力上升的前半段,2轮的速度继续下降并偏离列车运行速度。

3 有轨电车制动系统优化方案及试验验证

3.1 模拟轴减速度设置的方案优化

本车制动系统模拟轴减速度的设置参考了其他有轨电车,但实际上,各型有轨电车之间在车辆形式、制动减速度的设计、制动力的管理方式,以及运用环境条件上等均存在一定的差异,模拟轴减速度并不能完全通用。另外,通过整理不同载重条件下最大常用制动的实测减速度数据,发现基于基础制动摩擦材料的特性,制动时车辆实际瞬时减速度与理论的设计减速度也存在一定的偏差。

因此,根据最大常用制动的实测减速度,结合实际运行线路信息,对该有轨电车制动系统模拟轴减速度的设置方案进行了优化。制动系统优化前后的最大常用模拟轴减速度、实测减速度和设计减速度对比见图8。



注:AW0为空载;AW2为满座+6人/m²额定载荷;AW3为满座+9人/m²超常载荷;ED为电制动。

图8 模拟轴减速度设置方案优化前后的最大常用模拟轴减速度、实测减速度和设计减速度对比图

Fig. 8 Comparison chart of deceleration before and after the optimization of simulated shaft deceleration scheme

有轨电车模拟轴减速度设置方案优化后,再次对其进行最大常用制动试验(见图9)。通过试验发现,在有轨电车整个制动过程中EBCU控制正常,未再出现低速区段误检滑行的现象。

3.2 液压控制方案优化

液压控制系统的响应时间属于系统固有属性,提高其响应时间比较困难。针对2.2节出现的滑行轮速度跌落过多的问题,为减小制动缸压力增大过程中滑行轮速度继续跌落,当EBCU检测到车轮滑行后,适当提高制动缸压力上升速率,由6 MPa/s增加至12 MPa/s。

液压控制方案优化后,通过试验确认紧急制动的车轮防滑控制效果。图10为采集的A转向架滑

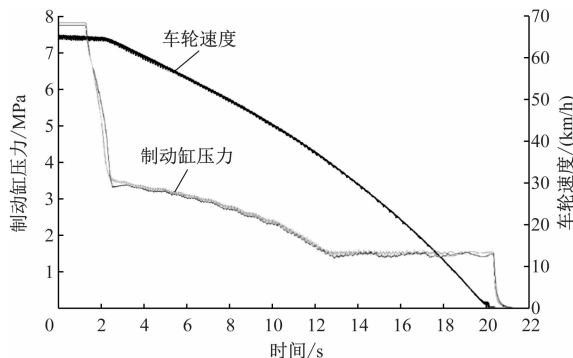
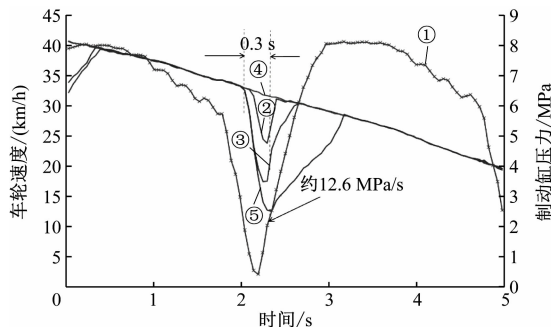


图9 有轨电车最大常用制动试验(模拟轴减速度设置方案优化后)

Fig. 9 Tram test of maximum service braking (after simulated shaft deceleration scheme optimization)

行轮速度数据。由图10可知,当EBCU检测到4轮出现滑行并控制增大制动缸压力至4轮的速度开始恢复历时约0.3 s,期间制动缸压力的上升速率相比优化前得到极大提高,各滑行轮的速度均能快速恢复至列车运行速度。



注:①为制动缸压力;②为1轮速度;③为2轮速度;④为3轮速度;⑤为4轮速度。

图10 有轨电车A转向架滑行试验数据曲线(液压控制优化后)

Fig. 10 Slip test data curve of tram bogie A (after hydraulic control optimization)

液压控制方案优化前后B转向架和C转向架滑行速度对比曲线,见图6和图11。由图6和图11可知,优化后滑行轮速度跌落幅度缩小,防滑控制效果良好;后续开展的其他滑行试验,也未再出现滑行轮速度跌落过多的现象。

4 结语

针对国内某种类型有轨电车,模拟轴减速度设

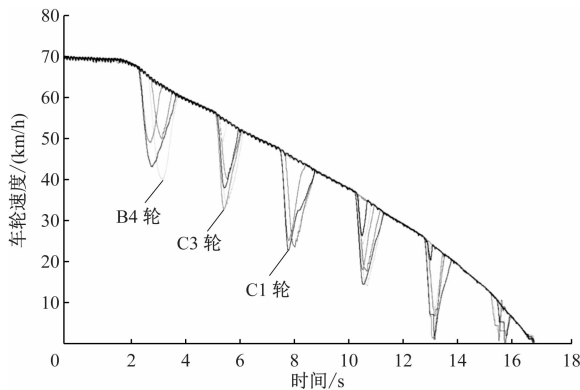


图11 有轨电车紧急制动防滑试验(液压控制优化后)

Fig. 11 Tram emergency anti-slide braking test (after hydraulic control optimization)

置的优化方案可以有效解决防滑试验过程中出现的低速区段误检滑行的问题;液压控制优化方案可提高充油速率,有效避免了防滑试验过程中出现的滑行轮速度跌落过多的问题。该优化方案可为其他类型有轨电车制动系统的设计和运用提供参考。

参考文献

- [1] 孙环阳,罗飞平,王群,等. 高速列车防滑控制策略研究[J]. 机车电传动,2017(5): 35.
SUN Huanyang, LUO Feiping, WANG Qun, et al. Study of wheel-slide-protection strategy of high-speed EMUs[J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(5): 35.
- [2] 韦皓. 动车组超低黏着轨面制动防滑性能试验研究[J]. 铁道学报,2017(9): 67.
WEI Hao. EMU anti-slide performance experimental study on ultra-low adhesion rail surface[J]. Journal of the China Railway Society, 2017(9): 67.
- [3] 左建勇,任利惠,吴萌岭. 铁道车辆制动系统防滑控制仿真与试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010(6): 912.
ZUO Jianyong, REN Lihui, WU Mengling. Simulation and experimental research on anti-sliding control of railway vehicle braking [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010(6): 912.
- [4] 杨东晨,樊贵新,齐政亮,等. 基于模糊控制的轨道交通车辆液压制动防滑策略研究[J]. 城市轨道交通研究,2019(7): 110.
YANG Dongchen, FAN Guixin, QI Zhengliang, et al. Hydraulic brake anti-sliding strategy for rail transit vehicle based on fuzzy control [J]. Urban Mass Transit, 2019(7): 110.

(收稿日期:2020-02-20)